

分类号\_\_\_\_\_

密级\_\_\_\_\_

U D C\_\_\_\_\_

编号\_\_\_\_\_

厦 门 大 学

## 博 士 后 研 究 工 作 报 告

大电流下 LED 的光效提升研究

张东炎

工作完成日期 2012 年 11 月-2014 年 11 月

报告提交日期 2015 年 01 月

厦 门 大 学

2015 年 01 月

# 大电流下 LED 的光效提升研究

## Research on Efficiency Improvement of GaN-based LEDs at High Driving Current Density

博 士 后 姓 名 张东炎

流动站（一级学科）名称 物理学

专 业（二级学科）名称 凝聚态物理

研究工作起始时间 2012 年 11 月

研究工作期满时间 2014 年 11 月

厦 门 大 学

2015 年 01 月

## 厦门大学博士后研究报告著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用博士后研究报告的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交该报告的纸质版和电子版，有权将该报告用于非赢利目的的少量复制并允许该报告进入学校图书馆被查阅，有权将该报告的内容编入有关数据库进行检索，有权将博士后研究报告的标题和摘要汇编出版。保密的博士后研究报告在解密后适用本规定。

本研究报告属于： 1、保密（ ）， 2、不保密（√）

纸本在 年解密后适用本授权书；

电子版在 年解密后适用本授权书。

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

日期： 年 月



## 摘 要

目前, III 族氮化物 LED 已经取得了商业化, 但要进一步取代传统照明, 真正使 GaN 基 LED 走进千家万户, 提升大电流注入条件下器件的功耗是当前研究的主要任务。本文着重研究电流密度为  $100\sim 150\text{ A/cm}^2$  注入条件下 GaN 基 LED 光电转换效率的提升。主要围绕器件外量子效率提升、有源区载流子限制作用提升及 V-pits 对功耗的影响等方面进行了一些研究。具体研究了具有埋入式孔洞结构底层对器件外量子效率的影响, 并通过优化低温缓冲层、p 型层生长条件降低对有源区发光的吸收来改善器件大电流下的外量子效率及功耗; 研究了 LB 层、pAl 电子阻挡层等关键层对载流子泄漏的影响, 设计并制备了具有 V-pits 的 GaN 基 LED 器件, 并与传统器件对比了大电流下的光电特性。取得了如下结果:

(1) 制备了具有孔洞结构 GaN 基 LED 器件, 孔洞尺寸为  $0.5\sim 1\mu\text{ m}$ , 孔洞结构嵌入在器件内部, 环绕在蓝宝石衬底图形周围, 不会对外延材料质量、芯片制备工艺及器件外观造成影响。采用孔洞结构能够增加有源区光线在图形衬底周围的反射率, 使大电流下光效提升 $\sim 4.8\%$ 。通过优化准二维生长速率、退火及氢化温度等参数, 使 ESD 通过率等到提升。

(2) 研究了新低温缓冲层对器件外延层材料质量的影响, 分析了较大注入电流下, 新低温缓冲层与常规器件 Droop 效应及功耗的差异, 并对不同电流密度下性能差异做出了初步解释。采用高温、高压条件可以降低 p 型层的 C 杂质浓度, 提升 p 型区的电导率, 降低工作电压。采用新 p 型生长条件能够得到工作电压更低、功耗更优的 GaN 基 LED 器件。

(3) LB 层厚度会影响 Mg 掺杂杂质分布曲线相对于多量子阱区及 n 型区的位置, 并能调节 p 型区 Mg 的扩散。LB 厚度过大或者过小, 都会引起大电流下器件功耗的降低, 通过优化 LB 厚度, 得到最优的厚度为  $6.4\sim 7.2\text{ nm}$ 。本研究还优化了 pAl 电子阻挡层的组分、周期数等重要参数, 并优化设计了具有渐变 Al 组分、Mg 掺杂的渐变电子阻挡层。采用该设计制备的 LED 器件能够同时改善小电流与大电流下的外量子效率, 并且维持较低的工作电压。 $100\text{ A/cm}^2$  注入电流密度下, 光电转换效率提升幅度为 $\sim 6.1\%$ 。

(4) 采用 InGaN/GaN 超晶格及具有前阱的多量子阱结构虽然使 V-pits 的尺

寸得到扩大，但没有改变多量子阱区的应力弛豫状态。新结构器件在  $150 \text{ A/cm}^2$  注入电流密度下的 Droop 效应由传统结构的 48.5% 下降至 45.1%，功效提升了 ~7%，本文对提升的原因做了初步解释。

关键词：GaN 基 LED，大电流注入，Droop 效应，功效，V-pits。

### Abstract

Group III-nitride based light-emitting diodes (LEDs) have been used in widespread applications such as solid-state lighting, backlight units for the liquid crystal displays and full color displays. However, the improvement of internal quantum efficiency (IQE) and light extraction efficiency (LEE) with low cost of LEDs modules become the essential issue to replace with the current solid-state lighting source. Here, we choose the conversion efficiency improving for commercial InGaN/GaN MQW LEDs driven at a current density of 100~150 A/cm<sup>2</sup> as a research topic. This work presents the fabrication of LEDs with embedded air voids with higher external quantum efficiency (EQE), improving confinement capability of carriers in the MQW region and the effects of V-pits on the conversion efficiency. The results of this work are as follows:

First, LEDs with embedded air voids were grown by lateral epitaxy overgrowth on patterned sapphire substrates (PSS) without excessive wet etching process or mask. Air voids with a size of 0.5~1 μm are distributed around the PSS pattern, which would not cause any other process problem in chip fabrication. The air void structures embedded in LEDs can improve light extraction by changing the effective refractive index  $n$ . Compared with the conventional devices, the conversion efficiency of LEDs driven at high current density with embedded air voids is increased by ~4.8%. What's more, the electrostatic discharge (ESD) properties of these LEDs have been improved by optimizing growth parameters.

Second, effects of low temperature buffer layer on the material quality of epilayers were studied. The differences between new buffer structure and conventional LEDs under high injection current were analyzed. The carbon concentration in p-GaN can be decreased by using higher temperature and pressure in MOCVD epitaxy. Under this condition, forward voltage can be reduced because of the lower resistance.

Third, most carriers tend to be confined in the last quantum well (QW) next to

the p-type layer and this well plays a dominant role in the radiative recombination. This is mainly due to the difficulty of injecting holes from the p-type region into QWs. So, the last barrier (LB, closest to p-GaN) has a great influence on the conversion efficiency of GaN LEDs. The optimized thickness of LB is 6.4~7.2 nm. At the same time, Al composition and the number of periods in p-type GaN/AlGaIn electron blocking layer (EBL) has been optimized. A graded Al-compositon and Mg-doping EBL have been designed to improve carrier transport in active region. Compared to conventional LEDs, the efficiency of new EBL LEDs is improved by ~6.1% under an injection of 100 A/cm<sup>2</sup>.

Finally, the effects of InGaIn/GaN super-lattice (SLs) on the morphology of V-pits have been investigated. The results show that V-pits can be enlarged by inserting InGaIn/GaN SLs and pre-MQWs. However, the degree of strain relaxation between InGaIn-QW and GaN-QB in MQW region is not changed. The output power can be improved by ~7% for LEDs with intentionally formed V-pits compared with conventional devices. Moreover, experiments show droop effect at 150 A/cm<sup>2</sup> is reduced to 45.1% from 48.5%.

**KEY WORDS:** GaN-based LEDs, high inject, Droop effect, conversion efficiency, V-pits.



## 目录

厦门大学博士后研究报告著作权使用声明.....	III
摘 要.....	I
Abstract.....	III
目录.....	V
第 1 章    绪论.....	1
1.1    引言.....	1
1.2    GaN 基 LED 的性能及产业化国内外现状 .....	2
1.3    GaN 基 LED 取代传统照明所面临的问题 .....	3
1.4    GaN 基 LED 大电流下光效提升研究进展 .....	4
1.4.1    GaN 基 LED Droop 效应的产生机理.....	4
1.4.2    Droop 效应改善研究进展 .....	11
1.5    本论文的内容安排.....	18
第 2 章    GaN 基 LED 取光效率提升研究 .....	20
2.1    具有埋入式孔洞结构的 GaN 基 LED 器件 .....	20
2.1.1    具有埋入式孔洞结构的 LED 器件制备.....	20
2.1.2    器件测试结果与分析.....	25
2.1.3    孔洞结构器件的 ESD 性能提升 .....	27
2.2    低温缓冲层对 LED 外量子效率的影响.....	34
2.2.1    低温缓冲层对外延层材料材料质量的影响.....	35
2.2.2    器件制备与性能测试.....	36
2.2.3    新低温缓冲层器件性能分析.....	37
2.3    p 型条件对大电流下 LED 外量子效率的影响.....	39
2.3.1    器件制备.....	39
2.3.2    测试结果与分析.....	40
2.4    本章小结.....	42
第 3 章    有源区电子限制作用提升研究.....	43
3.1    LB 厚度对大电流下 LED 功效的影响.....	43

3.1.1	不同厚度 LB 器件制备 .....	44
3.1.2	器件性能测试与分析.....	44
3.2	P 型 AlGaIn/GaN 超晶格对 LED 功效的影响 .....	46
3.2.1	P 型 AlGaIn/InGaIn 超晶格样品制备 .....	46
3.2.2	pAl 电子阻挡层 Al 组分对功效的影响.....	47
3.2.3	渐变型 pAl 电子阻挡层对器件功效的影响.....	49
3.3	本章小结.....	51
第 4 章	V-pits 对大电流下 LED 光效的影响 .....	52
4.1	引言.....	52
4.2	InGaIn/GaN 超晶格对 V-pits 形貌的影响 .....	53
4.3	具有大开口尺寸 V-pits 的器件制备 .....	55
4.4	V-pits 对大电流下 LED 功效的影响 .....	57
4.5	本章小结.....	60
第 5 章	结论.....	62
	参考文献.....	64
	致谢.....	72
	博士生期间发表的学术论文、专利.....	73
	博士后期间发表论文、专利.....	75

## 第1章 绪论

### 1.1 引言

GaN 基材料是继第一代 Si、Ge 元素半导体材料和第二代 GaAs、InP 化合物半导体材料之后的第三代半导体材料,通常又被称为宽禁带半导体材料,具有禁带宽度在 0.77 eV(InN)至 6.2 eV(AlN)之间连续可调的优点;另外其发光效率高,热导率高,化学稳定性好,可用于制作紫外、紫光、蓝光和绿光等波段的光电器件,自上世纪九十年代初, GaN 的 P 型掺杂技术突破后,全球掀起了 GaN 基半导体材料和器件研究的热潮。

发光二极管(Light Emitting Diode, LEDs),是半导体二极管的一种,可以将电能转换成光能。发光二极管与普通二极管一样是由 PN 结组成,具有单向导电性。在给发光二极管加上正向电压后,从 P 区注入到 N 区的空穴便与由 N 区注入到 P 区的电子,在 PN 结附近数微米的范围内复合发光。不同的半导体材料中电子和空穴所处的能量状态是不同的,电子与空穴复合时释放的能量越多,发射出的光的波长越短。光的峰值波长  $\lambda$  与发光区域的半导体材料禁带宽度  $E_g$  有关,即  $\lambda=1240/E_g$  (nm),式中的  $E_g$  单位为电子伏特 (eV)。若要产生可见光 (380 nm~780 nm),半导体材料的  $E_g$  应该在 3.26 eV~1.63 eV。

Nakamura 等人于 1993 年成功制备出 InGaN 双异质结蓝光 LED,外量子效率到达 2.7%<sup>[1]</sup>。1995 年, Nakamura 等人研制出了外量子效率为 6.3%、波长为 520nm 的单量子阱绿光 LED<sup>[2,3]</sup>,自此以后,LED 进入高速发展时期。经过十几年的探索前进,LED 已经找到一条适合市场发展的道路,不管是实验室还是企业都在推动着 GaN 基 LED 的蓬勃发展。

本章首先简要说明了 GaN 基 LED 的研究进展、产业化及市场国内外现状,然后介绍了进行大电流下 GaN 基 LED 光效提升研究的必要性,分析了 LED 光效随着电流密度增大而降低的物理机制及大电流密度下光效提升的研究方向,接着着重分析了大电流下 LED 光效提升及 Droop 改善的研究进展,最后给出了本文的内容安排。

## 1.2 GaN 基 LED 的性能及产业化国内外现状

根据中国绿色照明工程促进项目办公室的专项调查结果显示：我国每年的照明用电在 3000 亿度以上，如果采用 LED 取代全部的白炽灯或者部分取代荧光灯，则每一年将会减少三亿五千万吨的二氧化碳等污染物的排放并节省三分之一的照明用电，大约是 1000 亿度，这个数目几乎相当于一个总投资超过 2000 亿元的三峡工程全年的发电量。对于能源十分紧张的中国，大力发展 LED 产业无疑是具有十分重要的战略意义的。因此，在美国、日本、韩国等国家先后制订了国家半导体照明计划。从 2006 年的“十一五”开始，我国已把半导体照明工程作为一个重大工程来推行。

据统计，近五年来全球 LED 市场一直保持着 20% 左右的快速增长。LED 之所以在近几年大放光彩主要是因为其作为光源的一系列优点所致。LED 有体积小、能耗低、寿命长、高亮度、低热量、环保、坚固耐用、响应时间等一系列优点。

据统计，近五年来全球 LED 市场一直保持着 20% 左右的快速增长，截止到 2008 年，全球 LED 市场规模已经达到 96.7 亿美元。LED 之所以在近几年大放异彩主要是因为其作为光源的一系列优点所致。而在 2009 年到 2011 年之间，LED 产业在台湾地区以及中国大陆得到突飞猛进的发展。各地政府出台一系列政策，支持 LED 产业。各大城市争相使用 LED 照明产品，即体现绿色环保的城市发展理念，也促进了节能减排的进一步向前推进。半导体照明城市由最初的一两个，扩张到现在的二十几个。

国内市场在政府的大力支持以及市场的大量需求下，LED 产业蓬勃发展，不仅有像老的 LED 企业（厦门三安，武汉华灿等）不断地扩大再生产，也涌现了一批 LED 新生力量（大连路美，扬州中科半导体等）。GaN-LED 生产设备 MOCVD 也在最近两年内增加了数百台，MOCVD 设备出现供不应求的情况，LED 市场在今年也出现回暖。相信在不久的未来，LED 灯将真正走进千家万户。

当前，Cree、Nichia、Lumileds、Osram 等几家公司是国际上处于领先地位的照明级 LED 芯片及器件制造商，他们具有各自的外延和芯片技术路线，各家所生产的芯片产品封装白光器件的发光效率普遍超过 100 lm/W。2009 年 2 月，在 Photonics West 展会上，Nichia 展示小功率芯片的光效提高至 249 lm/W@20

mA<sup>[4]</sup>。2010年2月，Cree报道实验室的最新研发成果，标准测试环境下350 mA驱动LED可产生208 lm的光输出，相关色温为4579 K，光效可达208 lm/W，取得了目前大功率LED器件报道的光效最高值<sup>[5]</sup>。2012年4月，Cree白光功率型LED光效再度刷新行业最高纪录，标准室温、350 mA驱动电流、相关色温4408 K条件下，实测得到LED光效为254 lm/W<sup>[6]</sup>。2013年2月，Cree宣布白光功率型LED光效又一次刷新行业最高纪录，达到276 lm/W<sup>[7]</sup>，该项纪录打破了其在去年4月取得的254 lm/W研发成果，Cree研发报告显示，在相关色温4401K和350 mA驱动电流条件下，实测得到LED光效为276 lm/W。此外，Cree在照明技术展会“Lighting Fair 2013”（2013年3月5~8日，东京有明国际会展中心）上，展出了发光效率高达208 lm/W的白色LED产品“Cree XLamp MK-R”<sup>[8]</sup>，这是Cree在2012年12月宣布供货的产品，Cree是首家量产供货发光效率在200 lm/W以上的白色LED的厂商。今年3月份，Cree公司再度宣布白光功率型LED实验室光效达到303 lm/W，这一标志性研发成果，再度让业界眼前一亮<sup>[9]</sup>。

### 1.3 GaN基LED取代传统照明所面临的问题

虽然GaN基LED技术已经取得了很大进展，但GaN基LED要实现更大规模产业化，全面取代常规照明，最大的挑战是成本问题。未来的几年里，成本会大幅度降低，预计到2015年，LED的单价会从12.5~9 \$/Klm降低至2.3~2 \$/Klm；预计2020年，单价会降低至0.5 \$/Klm<sup>[10]</sup>。同时，到2015年，功效会从98~135 lm/W提升至162~190 lm/W；预计2020年，混色系LED的功效将达到266 lm/W<sup>[10]</sup>。为了达到以上的预期目标，就需要在内量子效率、取光效率以及降低器件串联电阻等方面取得新的突破<sup>[11]</sup>。

要降低成本，需要不断的缩小芯片尺寸，但为了达到相同的亮度，就需要增加驱动电流，从而导致驱动电流密度增加。理想情况下，同一LED芯片亮度增加的倍数与电流密度增加的倍数相同，即内量子效率（IQE）不随电流密度的变化而变化。但在实际应用中，内量子效率先随着电流密度增加，到某一峰值后，会随着电流密度的进一步增加而减小，即Droop效应。目前，商业化LED芯片的IQE在不到10 A/cm<sup>2</sup>的电流密度下就会达到峰值，当电流密度增加至~100

$\text{A}/\text{cm}^2$  量级，内量子效率会降低到峰值的 50%，甚至更低。尽管可以采用脉冲电流操作模式来降低芯片的工作温度，但 Droop 效应依然存在。因为 Droop 效应的存在，大电流下 GaN 基 LED 的光效急剧下降，严重制约了芯片尺寸的进一步缩小、成本的进一步降低。对于 Droop 产生的根源，是近几年 GaN 基 LED 的研究热点，但一直没有定论。现迫切需要建立起更加明确的设计方案跟准则来有效抑制 droop 效应，提升 GaN 基 LED 大电流下的光效<sup>[11]</sup>。

#### 1.4 GaN 基 LED 大电流下光效提升研究进展

GaN 基 LED 仍然有许多工作要做，比如 GaN 基材料的晶体质量的进一步改善、器件内、外量子效率的进一步提升及降低大电流下的 Efficiency droop 效应。以下将重点阐述 Efficiency droop 效应产生机理和研究进展。

##### 1.4.1 GaN 基 LED Droop 效应的产生机理

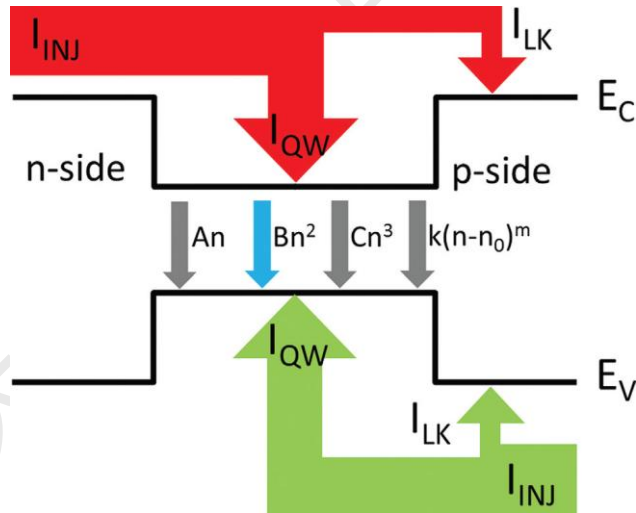


图 1-1 GaN 基 LED 中复合及泄露电流示意图<sup>[12]</sup>

IQE 可以用下式标示：

$$IQE = \frac{V_{QW} B n^2}{I_{INJ} / q} \quad (1-1)$$

其中， $I_{INJ}$  为注入到有源区的电流， $n$  为有源区电子密度（假定电子在有源区内是均匀分布，并且密度与空穴相当）， $V_{QW}$  为有源区体积， $q$  为电子电量， $B n^2$  为辐射复合速率。公式（1）中分子代表的是单位时间内有源区发射的光子数目，

分母是单位时间内注入到有源区的电子数目。理想情况下，注入到有源区的载流子全部转化为光子，此时内量子效率为 1。但实际情况下，因为有非辐射复合的存在，商业化 LED 的内量子效率很难达到 85% 以上。在采用麦克斯韦-玻尔兹曼统计的前提下，这些发生在 LED 有源区的非辐射复合中心包括 Shockely-Read-Hall 复合（复合速率与  $n$  成正比）、俄歇复合（复合速率与  $n^3$  成正比）等。另外，影响内量子效率并与 droop 相关的非辐射复合机制还有非局域化（复合速率与  $n^m$  成正比， $m \geq 2$ ）、载流子泄漏<sup>[13, 14]</sup>等。图 1-1 为考虑了载复合、载流子泄露等因素的流子输运示意图。内量子效率可以表示为：

$$IQE = \frac{Bn^2}{An + Bn^2 + Cn^3 + k(n - n_0)^m + \frac{I_{LK}}{qV_{QW}}} \quad (1-2)$$

这里， $An$  和  $Cn^3$  为 Shockely-Read-Hall 复合及俄歇复合速率， $I_{LK}$  为电子泄漏电流， $V_{QW}$  为有源区体积， $k(n - n_0)$  为与载流子非局域化导致的非辐射复合相关的项， $n_0$  和  $k$  分别为开始出现载流子非局域化的临界载流子浓度及常数，其中  $m \geq 2$ 。

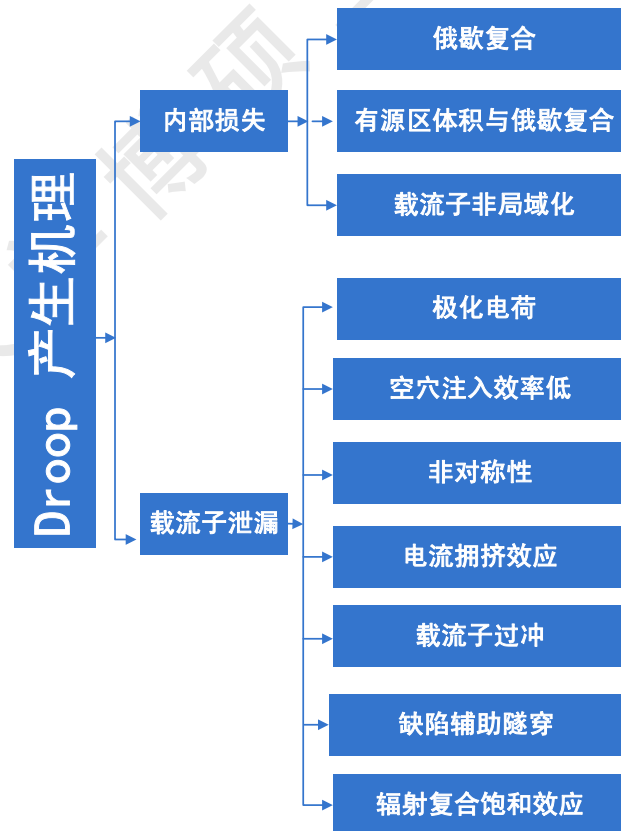


图 1-2 Droop 产生的机制分类

Droop 产生的机制按照发生的位置进行分类，发生在有源区内部的非辐射复合为内部损失（internal losses），在有源区外部的为载流子泄漏，具体如图 1-2 所示<sup>[11]</sup>。

### I. 内部损失

Philips Lumileds 公司的 Shen 等<sup>[17]</sup>认为俄歇复合在大注入电流下占主导地位，其作为一种非辐射复合减弱了 LED 的发光效率，是造成 droop 的主要原因。俄歇复合是一种三粒子参与的非辐射复合方式，电子和空穴进行复合产生的能量没有产生光子，而是将能量传给另外一个载流子（电子或空穴），使得这个载流子跃迁到高的能级上，然后这部分能量以声子的形式得以释放，也可以以其他弛豫机制如缺陷、散射等形式耗散掉<sup>[15]</sup>。俄歇复合几率与  $n^2p$  或  $np^2$  成正比（ $n$  和  $p$  分别为电子浓度和空穴浓度），因此当 LED 中的注入电流增加时，载流子浓度也随着增加，导致俄歇复合几率变得更大。在体材料中，俄歇复合过程与温度呈指数关系，可用  $T_0$  来描述发生俄歇复合的某一临界温度，其过程满足能量和动量守恒定律<sup>[16]</sup>。计算结果显示，对于禁带宽度为  $\sim 2.5\text{eV}$  的窄带隙 InGaN 材料，俄歇系数  $C$  为  $10^{-30}\text{cm}^6\text{s}^{-1}$ <sup>[17]</sup>；目前普遍接受的与蓝光 LED 具有相同 In 组分的 InGaN 体材料的俄歇系数  $C$  接近  $10^{-32}\text{cm}^6\text{s}^{-1}$ <sup>[18]</sup>。InGaN 体材料中，第一性原理计算获得的俄歇系数  $C$  可以总结如下表：

表 1-1 第一性原理计算获得的 InGaN 材料的俄歇系数  $C$

$C$ ( $\text{cm}^6\text{s}^{-1}$ )			
Direct		Indirect	
Intraband	Interband	Phonon	Alloy disorder
$3.5 \times 10^{-34}$ <sup>[19]</sup>	$2 \times 10^{-30}$ at $E_G=2.5\text{eV}$ <sup>[17]</sup>	$\sim 8 \times 10^{-32}$ (eeh) $\sim 2.5 \times 10^{-31}$ (hhe) <sup>[20]</sup>	$\sim 1 \times 10^{-31}$ <sup>[20]</sup>
$< 10^{-32}$ <sup>[18]</sup>	$< 10^{-32}$ at $E_G=2.9\text{eV}$ <sup>[18]</sup>	$< 4 \times 10^{-32}$ (eeh) $< 1 \times 10^{-31}$ (hhe) at $E_G \geq 2.5\text{eV}$ <sup>[21]</sup>	

一些研究表明要拟合出跟实际测量比较相近的 droop 效应，俄歇系数  $C$  需要大于  $10^{-31}\text{cm}^6\text{s}^{-1}$ <sup>[22-25]</sup>。但一些 LED 的 droop 效应较强，反而具有较小的俄歇系数  $C$ ，对此有些研究组也有不同的看法<sup>[26-29]</sup>。相对于传统 LED，虽然光学有源区体积减小较多，相对于相同电流下均匀分布的有源区，由于光学有源区里载流



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库